Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone (Proceedings of the Niamey Workshop, February 1991). IAHS Publ. no. 199, 1991.

Influence des états de surface sur l'infiltration en zone sahélienne

A. CASENAVE
ORSTOM, BP 375, Lomé, Togo

C. VALENTIN
ORSTOM, 70-74 Route d'Aulnay, F-93143 Bondy Cédex, France

Résumé L'analyse statistique des résultats obtenus, sur 139 parcelles soumises à 860 averses simulées, a permis de mettre en évidence et de hiérarchiser l'influence des facteurs conditionnels de l'infiltration sur une vaste zone géographique. Ainsi est apparu, en zone sahélienne, le rôle prépondérant des caractéristiques de la surface du sol sur l'infiltrabilité, notamment du type de croûte. A partir d'une typologie morpho-génétique des principales croûtes sahéliennes, et d'autres critères relatifs à l'activité faunique, à la couverture et au travail du sol, Casenave & Valentin (1989) ont proposé une typologie des principales surfaces élémentaires, caractérisées par un comportement hydrodynamique particulier. Une simple description de caractéristiques du milieu permet ainsi de quantifier l'infiltration et le ruissellement à l'échelle de la parcelle.

INTRODUCTION

Parmi les termes du bilan hydrique des sols, il en est deux, d'ailleurs complémentaires, l'infiltration et le ruissellement, qui intéressent particulièrement les hydrologues et les pédologues de l'ORSTOM.

Cet intérêt s'est traduit par de nombreuses études effectuées à deux niveaux.

Le premier concerne la mise au point et l'utilisation de techniques permettant de quantifier, de façon directe ou indirecte, l'infiltration à différentes échelles (études sur monolithes en laboratoire, mesures tensio-neutroniques, parcelles de ruissellement, micro-bassins versants, etc.). Cette mesure au champ de l'infiltration nécessite des expérimentations nombreuses sur une longue période, pour tenir compte de la variabilité spatiale de l'infiltration et de la variabilité temporelle des précipitations, particulièrement en zone sahélienne, où l'irrégularité de la pluviométrie est forte.

Dans le cadre de nombreux projets de développement, il est souvent nécessaire de répondre très rapidement à une demande, sans avoir la possibilité de mettre en oeuvre des mesures précises mais longues. D'où le second niveau qui vise à une estimation rapide de valeurs vraisemblables de l'infiltration et du ruissellement, à partir de critères représentatifs du milieu, facilement mesurables.

C'est à ce second type d'approche que se rattachent les résultats présentés dans cet article

FACTEURS CONDITIONNELS DU RUISSELLEMENT EN AFRIQUE DE L'OUEST

Méthodologie

Depuis le milieu des années 70, les hydrologues et pédologues de l'ORSTOM utilisent, pour améliorer leur connaissance de l'hydrodynamique des sols, des simulateurs de pluie qui permettent de s'affranchir des aléas des précipitations naturelles.

Après avoir utilisé un premier appareil dérivé du simulateur de type Swanson, arrosant deux parcelles de 50 m^2, ils ont mis au point, en 1977, un minisimulateur de pluie permettant d'étudier des parcelles de 1 m^2 (Asseline & Valentin, 1978). La comparaison des résultats obtenus sur ces parcelles avec ceux des parcelles de 50 m^2 (Collinet, 1986) ou avec les données des bassins représentatifs (Casenave *et al.*, 1982) a montré que, malgré la faible surface étudiée, l'appareil était fiable sous réserve d'une utilisation appropriée.

Depuis 1980, l'ORSTOM a largement développé cette nouvelle technique, mise au point en Côte d'Ivoire (Casenave, 1982), dans de nombreux pays d'Afrique francophone (Côte d'Ivoire, Burkina Faso, Niger, Togo, Cameroun, Congo, Sénégal).

Résultats

Pour chacune des parcelles testées sous pluies simulées (139), un certain nombre de variables caractéristiques du milieu ont été mesurées: couvert végétal (*V*); tailles des constituants en surface (*T*); microrelief (*R*); réorganisations superficielles (*P*); traces d'érosion (*E*); activité faunique (*B*); fentes en surface (*F*); et traces d'hydromorphie (*H*).

Cinq variables, représentatives de l'infiltration (Casenave, 1982): coefficient d'infiltration sur l'ensemble du protocole (*KI*); intensité limite de ruissellement (*Il*); pluie d'imbibition sur sol sec (Pi_s) et sur sol humide (Pi_h); et détention superficielle récupérable (*Dr*) ont été quantifiées à partir des enregistrements obtenus à chacune des averses simulées.

Une étude des corrélations entre ces différentes variables montre que *KI*, *Il*, Pi_s et Pi_h sont significativement liés à *V*, *B* et *P*. Le coefficient d'infiltration *KI* est aussi significativement lié à *R*. Il ne faut, toutefois, pas accorder une grande signification à ces coefficients de corrélation, car les distributions des variables ne sont pas normales. Elles permettent cependant de sélectionner *KI* comme variable la plus représentative de l'infiltration.

Une analyse factorielle des correspondances (AFC) a été réalisée sur les variables regroupées en classes. Cette analyse permet de distinguer deux

groupes de variables très cohérents:

Groupe 1: faible infiltration expliquée par l'absence de végétation, de fortes réorganisations superficielles, une activité faunique nulle et une taille importante des constituants en surface; et

Groupe 2: infiltration forte expliquée par une végétation importante, l'absence de croûtes et une activité biologique moyenne à forte.

Cette AFC met également en évidence une opposition entre parcelles de région sèche (pluie moyenne interannuelle <850 mm) et celles des régions plus humides.

Sur les 56 parcelles de la zone sèche, l'AFC confirme l'évolution parallèle des variables *KI*, *V*, *B* et *P*, mais 38 de ces parcelles ont des valeurs de *V*, *B* et *P* très voisines alors que *KI* varie de 4 à 65%.

On a ensuite utilisé des corrélations multiples pour essayer de prédire *KI* en fonction des variables descriptives du milieu.

Sur l'ensemble du fichier, quatre variables expliquent significativement *KI*: $KI = f(V, R, B, P)$ ($R^2 = 0.67$), mais la qualité de la prédiction est relativement faible puisque pour 27 des 139 parcelles l'erreur absolue sur la valeur de *KI* est supérieure 20%.

Sur le fichier des parcelles de la zone sèche, les résultats sont meilleurs puisque trois variables suffisent à expliquer significativement *KI*: $KI = f(V, B, P)$ ($R^2 = 0.84$). Avec ce modèle, seules deux parcelles ont un coefficient d'infiltration prédit avec une erreur absolue supérieure 20%.

L'ensemble de ces mesures (860 averses) ainsi que les résultats antérieurement obtenus en zone forestière (Casenave *et al.*, 1982) ont permis de déterminer, sur une vaste zone géographique, les facteurs conditionnels de l'infiltration et du ruissellement et de hiérarchiser l'importance relative de ces différents facteurs (Valentin, 1986).

De trop nombreux exemples montrent cependant que l'utilisation aveugle de telles formules statistiques n'est pas exempte de dangers et qu'une approche plus naturaliste, de type système expert, peut constituer un "garde fou" précieux, en fournissant un mode d'emploi de ces régressions. C'est pourquoi Casenave & Valentin (1989) ont proposé une typologie des surfaces élémentaires, qui essaye de concilier les deux approches; statistique et naturaliste. Cette typologie est fondée sur une base expérimentale et des traitements statistiques, mais ses résultats sont pondérés par des critères d'ordre morphologique.

LA TYPOLOGIE DES SURFACES ELEMENTAIRES

A la base de cette typologie se trouve le concept de "surface élémentaire" qui désigne, à un instant donné, un ensemble homogène constitué par:

- le couvert végétal;
- la surface du sol; et
- les organisations pédologiques superficielles qui ont subi des transformations sous l'effet des facteurs météorologiques, fauniques ou anthropiques: les croûtes.

Les critères d'identification

La typologie des surfaces élémentaires repose sur un certain nombre de critères caractéristiques du milieu, dont l'analyse statistique a montré qu'ils influençaient de manière sensible la capacité d'infiltration. Ces principaux critères sont les suivants.

Le type de croûte L'étude des processus et l'analyse des facteurs de formation des croûtes superficielles, associées à la description des microhorizons, ont amené Casenave & Valentin (1989) à la définition d'une typologie morpho-génétique des principales croûtes sahéliennes. Cette typologie, synthétisée dans la Fig. 1, permet de distinguer neuf types principaux dont la désignation fait référence à leurs mécanismes de formation.

La nature du milieu: naturel ou cultivé Deux facteurs conditionnels importants de l'infiltration, la couverture végétale et le microrelief, sont considérablement modifiés par la mise en culture. De plus, l'évolution des surfaces est différente en milieu naturel où les croûtes, une fois formées, sont relativement protégées et en milieu cultivé où les croûtes sont souvent détruites par les travaux culturaux. Ceci a amené à distinguer ces deux types de milieu.

La porosité vésiculaire Les microhorizons des croûtes sahéliennes sont souvent riches en vésicules qui peuvent créer une très forte porosité. Celle-ci n'est cependant pas fonctionnelle, les pores ne communiquant pas les uns avec les autres. Il s'agit pourtant d'un indice précieux de conditions peu favorables à l'infiltration. Ces vésicules se forment, en effet, lors de l'humectation, lorsque l'air du sol ne peut s'échapper dans aucune direction, du fait d'une forte imperméabilité du milieu. L'analyse statistique a mis en évidence une très bonne relation entre l'abondance de ces pores et l'aptitude au ruissellement (Albergel *et al.*, 1985).

L'activité faunique Elle a une influence directe sur l'infiltration par la porosité qu'elle génère. Lavelle (1983), par exemple, a montré qu'à Lamto (Côte d'Ivoire), les vers rejettent 30 à 40 m^3 de terre en surface, par hectare et par an. A ce volume de rejets correspond un volume comparable de pores à l'intérieur du sol et cette porosité communique avec la surface, facilitant ainsi le drainage rapide de l'eau. De plus, et ce n'est pas là le moindre des effets du travail de la mésofaune, elle détruit, au moins localement, les croûtes qui s'opposent à l'infiltration.

La charge grossière Il s'agit des fractions granulométriques de taille supérieure à 2 mm. Cette charge grossière peut être utilisée comme indicateur de l'infiltrabilité parce qu'en zone aride et semi-aride, elle s'accompagne, le plus souvent, d'un degré de réorganisation maximal. Les éléments grossiers sont, dans la majeure partie des cas, englobés dans une croûte à trois microhorizons (Type ST3) très imperméable.

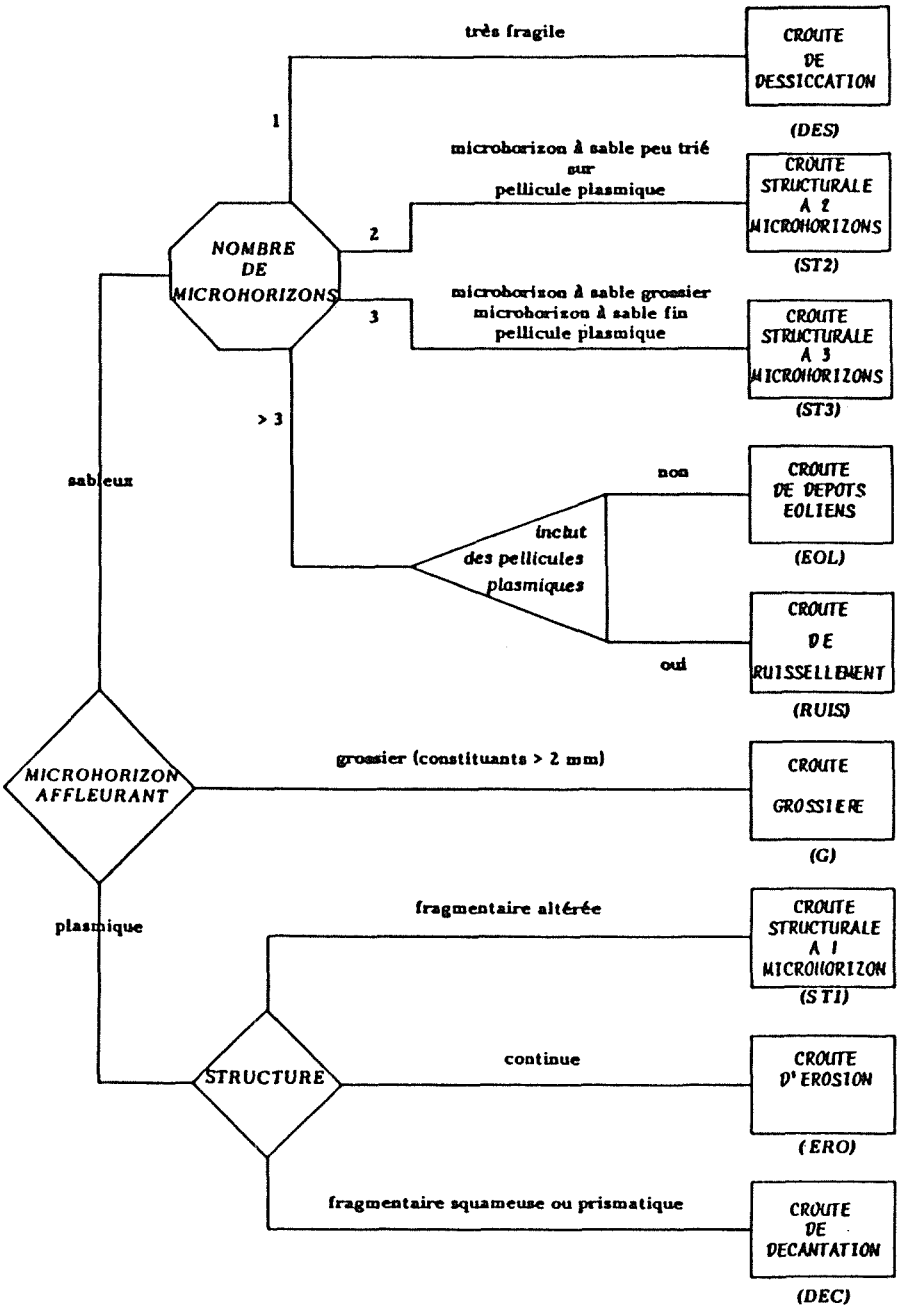

Fig. 1 Clef de détermination des principales croûtes sahéliennes.

Les éléments "modulateurs" Pour tenir compte de la diversité des milieux étudiés, on a été amené à définir, dans certains types de surface, des

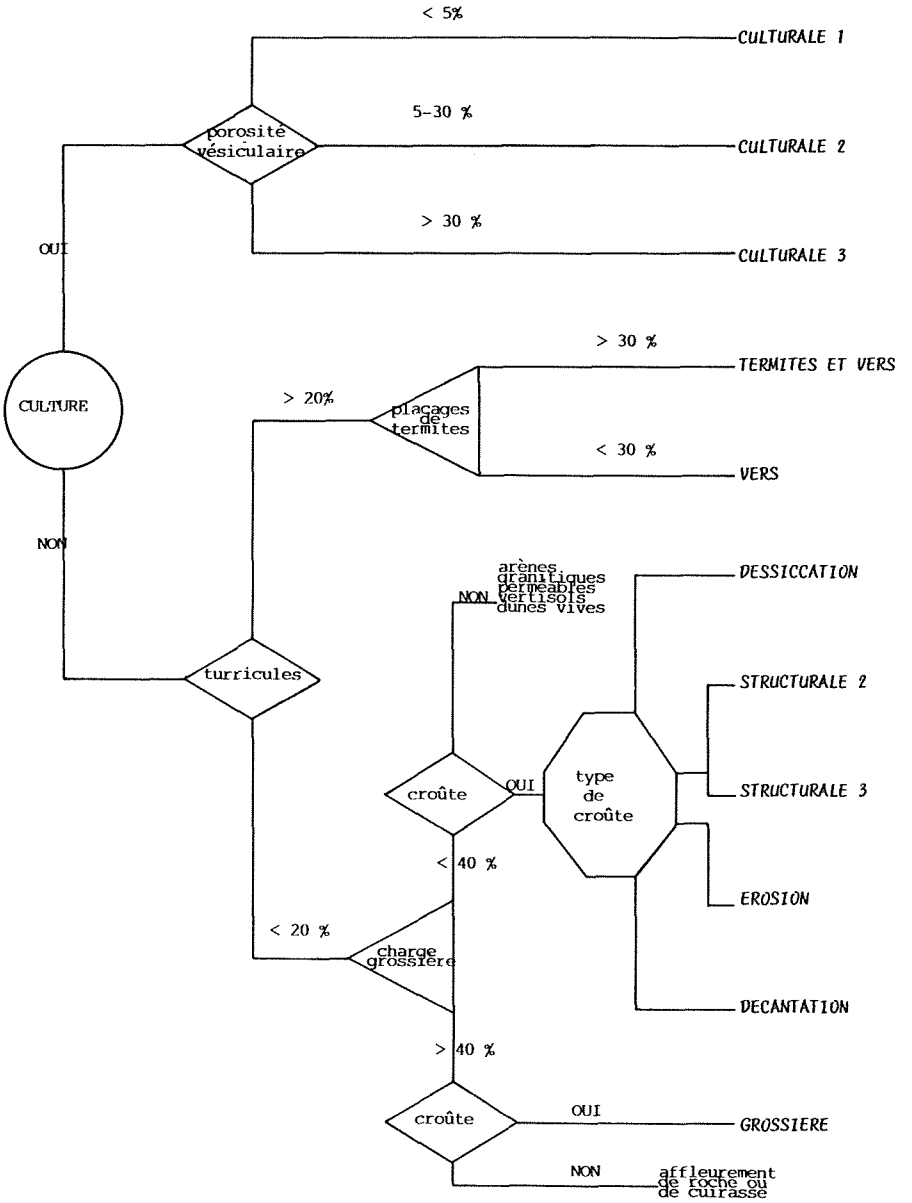

Fig. 2 Clef de détermination des types de surfaces élémentaires.

variantes en fonction d'éléments "modulateurs" qui sont:

La couverture végétale Elle intervient en assurant la protection du sol contre les "agressions" extérieures (pluie, vent, etc.) qui sont les principaux agents de formation des croûtes. Elle n'est prise en compte que lorsqu'elle couvre une surface au sol supérieure à 50%.

Le microrelief Ce sont les petits accidents du terrain, d'une amplitude comprise entre 5 et 50 cm, naturels ou induits par les techniques culturales, qui confèrent au sol la rugosité susceptible de diminuer le ruissellement et d'augmenter le stockage superficiel de l'eau.

La texture du sol Pour la zone sahélienne, seules la texture très sableuse (taux des sables >90%) et la texture argileuse (taux d'argile >40%) ont une influence sur l'infiltration.

Ces éléments modulateurs ne changent pas la définition du type de surface, mais ont une influence sur les valeurs de l'infiltration qui lui sont liées.

Les grands types de surfaces élémentaires

A partir des critères d'identification précédents, on peut classer toutes les surfaces élémentaires en 11 grands types. La clef de détermination en est donnée à la Fig. 2.

A chaque type de surface élémentaire (type modal ou variante) correspond un fonctionnement hydrologique particulier qui est caractérisé par une équation du ruissellement (uniquement pour le type modal) et les fourchettes des valeurs que peuvent prendre certaines variables de l'infiltration. Un exemple en est donné ci-après pour les surfaces de type ST2 (croûte structurale à deux microhorizons).

Surface de type structurale 2: ST2 Définition: Surface non cultivée présentant moins de 20% de turricules de vers et moins de 40% de charge grossière, couverte d'une croûte structurale à deux microhorizons (sable grossier continu légèrement pris en masse recouvrant une pellicule plasmique).

Ruissellement: $Lr = 0.85\ Pu + 0.01\ IK + 0.003\ Pu\ IK - 8.0$

où:
Lr = lame ruisselée en mm,
Pu = hauteur de l'averse en mm,
IK = indice des précipitations antérieures (Casenave, 1982).

Infiltration: Les valeurs caractéristiques de l'infiltration pour le type modal sont données dans le Tableau 1. Si la couverture végétale est supérieure à 50%, on se reportera au Tableau 2.

EXEMPLE D'UTILISATION DE LA TYPOLOGIE

Calage d'un modèle agroclimatologique

Pour illustrer cet exemple, nous avons choisi le modèle BIP, développé par l'IRAT (Forest, 1984) et largement utilisé en Afrique de l'Ouest. Ce modèle qui simule le bilan hydrique d'une culture pluviale, intègre une fonction

Tableau 1 *Caractéristiques de l'infiltration pour une surface élémentaire de type ST2 modal*

Ki (%)	Ki_0 (%)	Ki_{20} (%)	Il (mm h^{-1})	Pi_s (mm)	Pi_h (mm)
40-55	60-75	50-65	5-15	10-20	3-6

Ki = *coefficient d'infiltration pour l'ensemble du protocole des pluies simulées sur une parcelle;*
Ki_0 = *coefficient d'infiltration pour une pluie de 50 mm et IK = 0;*
Ki_{20} = *coefficient d'infiltration pour une pluie de 50 mm et IK = 20;*
Il = *intensité limite de ruissellement (Casenave, 1982);*
Pi_s = *pluie d'imbibition pour un sol sec (IK = 0) et*
Pi_h = *pluie d'imbibition pour un sol très humecté (IK > 80).*

Tableau 2 *Caractéristiques de l'infiltration pour une surface élémentaire de type ST2 avec couverture végétale > 50%*

Ki (%)	Ki_0 (%)	Ki_{20} (%)	Il (mm h^{-1})	Pi_s (mm)	Pi_h (mm)
60-70	80-90	75-85	10-20	20-30	5-10

simple du ruissellement qui est fondée sur deux critères: la texture et la technique culturale. En fonction de ces deux critères, l'auteur donne des valeurs de la pluie d'imbibition et du coefficient de ruissellement qui sont les deux paramètres de la fonction du ruissellement :

Sol non travaillé ou travail superficiel:

texture sablo-argileuse: Pi = 20 mm, Kr = 30%;

texture argileuse: Pi = 10 mm, Kr = 40%;

sol labouré:

texture sablo-argileuse: Pi = 30 mm, Kr = 10%;

texture argileuse: Pi = 20 mm, Kr = 20%.

Pour les sols cultivés, Casenave & Valentin (1989), distinguent trois grands types de surface, en fonction de la porosité vésiculaire:

surface de type C1: porosité vésiculaire absente ou très faible (<5%);

surface de type C2: porosité vésiculaire peu abondante (5 à 30%); et

surface de type C3: porosité vésiculaire forte (>30%).

Pour chacun de ces types de surface, les auteurs fournissent (Tableau 3) des valeurs des coefficients de ruissellement ou des pluies d'imbibition, pour un sol sec (Kr_0 et Pi_s) ou très humecté (Kr_{20} et Pi_h). Du fait de l'impossibilité de tester, sur nos parcelles de taille réduite, des pratiques culturales à très fort microrelief, ces valeurs correspondent à des sols peu travaillés (travail à plat et, dans une moindre mesure, billonnage et buttage). Elles ne sont donc comparables qu'à celles données par Forest pour les sols non ou

superficiellement travaillés. On peut remarquer que ces valeurs sont souvent assez éloignées des valeurs originelles du modèle. Pour un sol argileux peu travaillé, la valeur du coefficient de ruissellement utilisée dans le modèle est de 40%, alors que pour une surface de type C2, elle serait de l'ordre de 70%. De même, pour un sol sablo-argileux peu travaillé, si la valeur de *Kr* du modèle est compatible avec une surface de type C2 modal, elle est surestimée pour une surface de type C1 et fortement sous-estimée pour une surface de type C3, qui est relativement courante sur un sol de cette nature.

Tableau 3 *Caractéristiques du ruissellement pour des sols cultivés*

Type de surface	*Variante*	Kr_0 *(%)*	Kr_{20} *(%)*	Pi_s *(mm)*	Pi_h *(mm)*
C1	*modal*	*10-20*	*15-25*	*25-30*	*5-15*
	végétation > 50%	*0-10*	*5-15*	*30-40*	*20-30*
	éléments grossiers > 40%	*35-45*	*45-55*	*5-15*	*1-5*
C2	*modal*	*20-40*	*30-50*	*8-12*	*2-4*
	fort microrelief	*10-20*	*10-25*	*15-25*	*5-10*
	argile > 30%	*60-75*	*70-80*	*8-12*	*2-4*
C3	*modal*	*60-75*	*70-80*	*8-15*	*2-4*
	fort microrelief	*20-40*	*30-50*	*20-30*	*5-10*

Kr_0 = *coefficient de ruissellement pour une pluie de 50 mm et IK = 0.*
Kr_{20} = *coefficient de ruissellement pour une pluie de 50 mm et IK = 20.*

Il est évident que les "performances" du modèle, qui calcule l'évapotranspiration réelle et la compare aux besoins en eau des cultures, pour définir un indice de satisfaction des besoins en eau, sont fortement influencées par les valeurs de *Kr* et *Pi*.

A titre d'exemple, nous avons utilisé ce modèle, pour une variété de mil 90 jours, en y introduisant la pluviométrie journalière de Niamey des années 1905 à 1982, une première fois avec les valeurs standard du modèle pour un sol argileux travaillé de façon superficielle, et une seconde fois avec les valeurs correspondant à une surface de type C2, pour un sol argileux. Dans le premier cas, le coefficient moyen de satisfaction pour la période est de 0.63 alors que dans le second, il tombe à 0.40.

CONCLUSION

Comme l'ont déjà montré de nombreuses applications de cette typologie, il semble possible, en zone sahélienne, de prévoir certaines caractéristiques de l'hydrodynamique superficielle, à partir des critères simples du milieu, pris en compte pour l'identification des surfaces élémentaires.

Il convient de signaler que si cette typologie s'applique, en priorité, à la zone sahélienne, elle semble également convenir aux milieux anthropisés

d'autres zones climatiques, dès lors que la couverture du sol n'est plus assurée:

- les milieux cultivés de manière intensive (Valentin & Ruiz-Figueroa, 1987); et
- les milieux urbains où l'on a mis en évidence une analogie certaine d'organisation et de comportement des surfaces avec celles de la zone sahélienne (Janeau & Bouvier, 1987).

REFERENCES

Albergel, J., Ribstein, P. & Valentin, C. (1986) L'infiltration: quels facteurs explicatifs? Analyse des résultats acquis sur 48 parcelles soumises à des simulations de pluies au Burkina Faso. *Journées Hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Collection ORSTOM, Colloques et Séminaires,* 25-48.

Asseline, J. & Valentin, C. (1978) Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. ORSTOM série Hydrologie* **XV** (4), 321-349.

Casenave, A. (1982) Le minisimulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. *Cah. ORSTOM série Hydrologie* **XIX** (4), 207-227.

Casenave, A., Guigen, N. & Simon, J. M. (1982) Etude des crues décennales des petits bassins versants forestiers en Afrique tropicale. *Cah. ORSTOM s Hydrologie* **XIX** (4), 229-252.

Casenave, A. & Valentin, C. (1989) *Les Etats de Surface de la Zone Sahélienne. Influence sur l'Infiltration.* Edition de l'ORSTOM, collection didactiques.

Collinet, J. (1986) Hydrodynamique superficielle de quelques types de sols du Sahel africain, comparaison des données fournies par deux dimensions de parcelles de simulation de pluie. *Journées Hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Collection ORSTOM, Colloques et Séminaires,* 117-153.

Forest, F. (1984) *Simulation du Bilan Hydrique des Cultures Pluviales.* Présentation et utilisation du logiciel BIP. IRAT/CIRAD, St Clément la Rivière.

Janeau, J. L. & Bouvier, C. (1987) *La Simulation de Pluie et les Etats de Surface en Milieu Urbain.* ORSTOM, Abidjan.

Lavelle, P. (1983) The soil fauna of tropical savannas. II. The earthworms. In: *Tropical Savannas,* 485-504. Bourliere edn, Elsevier, Amsterdam.

Valentin, C. (1986) Différencier les milieux selon leur aptitude au ruissellement: une cartographie adaptée aux besoins hydrologiques. *Journées Hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Collection ORSTOM, Colloques et Séminaires,* 50-74.

Valentin, C. & Ruiz-Figueroa, J. F. (1987) Effects of kinetic energy and water application rate on the development of crusts in a fine sandy loam soil using sprinkling irrigation and rainfall simulation. In: *Micromorphologie des Sols,* 401-408. AISS/AFES, Paris.